

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630086

研究課題名(和文) 運動支援および感覚刺激による高次運動早期獲得技術の実現

研究課題名(英文) Enhancement of motion learning with physical support and sensory stimulation

研究代表者

長谷川 泰久 (Yasuhisa, Hasegawa)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70303675

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、fMRIによる歩行模擬動作時の脳機能解析を可能とするために下肢動作提示システムLoMSを研究開発し、LoMSがfMRI撮像中に使用可能であることを示すためにLoMSがMRI適合性を有することを確認した。次いでLoMSが提示する歩行模擬動作を、動作時の生体電位遷移及び遊脚期の足関節底屈筋の抑制をトレッドミル歩行時と比較し評価した。また、LoMSによる歩行模擬動作時の脳活動をfMRIで計測し、歩行模擬動作により歩行と関連する脳領域が賦活することを確認した。

研究成果の概要(英文)：This project reports an evaluation of muscle activity of volunteers while they undergo gait-like motion in their dorsal position supported by our lower-extremity motion simulator (LoMS) that is magnetic resonance imaging (MRI) compatible. A purpose of providing gait-like motion by LoMS is to enable a wearer in the dorsal posture to move his/her lower extremities like gait. LoMS is controlled with torque control based on predictive control method to convert the gravity effect of the dorsal posture into the caudal posture. The performance providing gait-like motion is evaluated from two viewpoints of muscle activities: bioelectrical potential (BEP) transition and inhibition of musculus soleus during the motion. There were correlation of BEP transition at iliopsoas, quadriceps femoris, musculus tibialis anterior, and musculus soleus. The inhibition during the gait-like motion provided by LoMS was similar to the inhibition during treadmill gait.

研究分野：ロボット工学

キーワード：運動支援 外骨格 MRI 下肢運動 脳活動

1. 研究開始当初の背景

脳機能の探求は科学の歴史以来の人の興味である。大脳皮質はその部位により異なる機能を担う(大脳皮質機能局在)。大脳皮質機能局在の検索方法は大きく(1)病態との関連による臨床的手法、及び(2)近代的検索方法に分けられる。(1)は更に(1-a)脳内病変と症状との関連、及び(1-b)てんかん発作の症候分析に分けられる。一方、(2)は(2-a)大脳皮質の電気・磁気刺激法(外的脳刺激方法)、及び(2-b)脳機能賦活検索法に分けられる。(1-a)及び(1-b)は病変による機能の損失や低下により大脳機能局在を検索しているため、病的状態を切り離すことは不可能である。また、(2-a)は脳外科手術が必要な患者に行われることが常であり、更に外的脳刺激によりてんかん発作を模擬するものであるため、病的状態を切り離すことは不可能である。健常脳において大脳機能局在を検索するためには(2-b)により特に非侵襲的に脳活動を計測する必要がある。

代表的な脳電位の計測法としてEEGがある。また頭皮表面から賦活を計測する方法として、近赤外分光法(Near-infrared spectroscopy: NIRS)がある。EEGやNIRSは時間分解能が高いが空間分解能が低く、また、脳表層の計測に限られるという特徴がある。しかしながら、脳回路は脳表層で完結することはなく、脳の深部領域も含まれる。そのため、より深く脳機能を解析する為には脳全域を計測する必要がある。脳全域を計測可能な手法として機能的核磁気共鳴画像(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)や単一光子放射断層撮影(Single photon emission computed tomography: SPECT)などがある。SPECTは体内に放射性同位体を投与し、その放射性同位体から放出されるガンマ線を計測することにより賦活を捉える。SPECTは放射性同位体を体内に投与するため、非侵襲とは言い難い。そこで、非侵襲であり脳の全領域を計測可能であるfMRIに着目する。

2. 研究の目的

fMRIを用いた下肢動作と脳活動の関係を明らかにする研究として、足関節動作時の脳活動計測が広く行われている(C. Sahyoun et al., 2004)。また、膝関節に抵抗を与えた場合の脳活動への影響が研究されている(Y. Thijs et al., 2010)。これらの研究では単関節の動作を対象としている。また、下肢全体の動作を対象とした脳活動の研究として、自転車のペダルを模した機器を用いたペダル漕ぎ動作時の脳活動計測(Jay P. Mehta et al., 2009)やステップ動作を対象とした脳活動計測(C. Hollnagel et al., 2011)が行われている。しかし、これらの研究では動作は片脚1自由度であり、歩行動作を初めとする下肢の様々な動作を許容しておらず、歩行動作時の脳活動を計測することが出来ない。そこで本

論文では歩行動作時の脳機能解析を可能とする為に、以下の目的を設定する。

- ・ 歩行模擬動作及び動作に伴う足底反力を提示可能な下肢動作提示システムを開発し、fMRI撮像環境下で歩行動作を提示可能であることを示す為に、システムがMRI適合性を満たすことを確認する。
- ・ 本システムが歩行模擬動作を提示することにより、装着者に歩行時の動作感覚を提示可能であることを装着者の筋活動を計測し確認する。

本システムで歩行模擬動作を提示することにより、歩行に関連する脳領域での賦活をfMRIにより計測可能であることを確認するとともに、下肢動作による脳活動変化について述べる。

3. 研究の方法

歩行模擬動作提示装置(LoMS)による歩行模擬動作により人に与える動作感覚を、トレッドミル歩行時と歩行模擬動作時の生体電位(BEP)遷移、および足関節底屈筋の抑制を比較し評価する。

(1) 生体電位遷移による評価

歩行時に使用する主要な5つの筋においてBEPを計測する。計測する筋は腸腰筋(IP)、大腿四頭筋(QF)、大腿二頭筋(BF)、前脛骨筋(TA)およびヒラメ筋(SOL)の5筋である。計測したBEP_rは

$$BEP = 1/T \cdot \int |BEP_r / MVC| dt \cdot 100 \quad [\%MVC] \dots (Eq.1)$$

で移動平均を取る。積分範囲Tは50[ms]とした。MVCは最大随意収縮時のBEPである。BEPのサンプリング周波数は2000[Hz]、トレッドミル歩行及び歩行模擬動作の動作周期は2[sec]とした。

(2) 足関節底屈筋の抑制による評価

歩行時の遊脚期に足関節底屈筋であるヒラメ筋や腓腹筋などで抑制が見られる(N. Petersen, et al. 1999)。遊脚期の抑制を確認するにはH波を用いることが一般的である。H波は脛骨神経を刺激することでヒラメ筋に発現する。脛骨神経を電気刺激すると刺激がG1a求心性線維を上行し、運動ニューロンが刺激されることで遠心性線維を収縮指令が下行し、刺激から約30-40[ms]後にヒラメ筋でH波が発現する。歩行の遊脚期に、立脚と比較しH波強度が低下することで遊脚期の抑制を確認可能である。本評価ではLoMSが提示する歩行模擬動作時に、歩行時に見られる抑制が生じることを確認することで、歩行模擬動作が歩行を再現していることを示す。

歩行模擬動作時及び歩行時のヒラメ筋のBEPを計測し、遊脚期のH波が抑制されることを確認する。BEP計測周波数は2,000[Hz]とし、両動作の周波数は0.5[Hz]とした。H波を誘発する為、膝窩部中央から脛骨神経を電気刺激した。膝窩部に負極、膝頭下部に正極の刺激電極を固定した。H波強度は

$$I_H = BEP_H - BEP_B \dots (Eq.2)$$

で求める。BEP_Hは刺激から30-40[ms]後のBEPの平均値、BEP₀は刺激から25-75[ms]前及び65-115[ms]後のBEPの平均値である。実験で用いる刺激強度を決定する為に、各被験者で安静立位時(膝関節0[deg])に刺激強度を1[mA]から徐々に上げ、H波強度が最も高くなる刺激強度を実験に用いる強度とした。なお、被験者が刺激により痛みを感じない範囲で刺激を行った。動作時の刺激周波数は1.4[Hz]、刺激継続時間は0.8[ms]とした。動作サイクルを10相(立脚期は1-5相、遊脚期は6-10相)に分割し、被験者毎に各相のH波強度の平均値を算出し、

$$Ave_H = 1 / n \cdot \sum I_{Hi}$$

($i = 1, \dots, n$: 刺激数) ... (Eq.3)

立脚期中のH波強度の最大値Ave_{Hmax}により標準化した。

$$rAve_H = Ave_H / Ave_{Hmax} \dots (Eq.4)$$

(3) 歩行模擬動作時の脳活動解析

人がLoMSを装着し歩行模擬動作を行っている際の脳活動をMRIにより計測可能であることを、実際にfMRI計測を行い確認する。本予備実験は歩行模擬動作時の脳活動解明が目的ではなく、歩行模擬動作時の脳活動をfMRI計測が可能であることを示すことを目的とする。被験者は健康な20代男性13名である。対象とする歩行模擬動作はMRI寝台上に仰向け姿勢となり、LoMSを装着しLoMSによる支援を受けながら能動的に動作を行う。なお、下肢の下にMRI寝台は無く下肢を上下にスイングが可能であり、実際の歩行と同様の軌道を描くことが可能である。動作周期は2[sec]とする。また、足底反力提示装置により、動作周期に合わせた反力提示を行う。なお、下肢の動作により頭部が動くためfMRI画像が生成出来なくなるため、頭部の動作を抑制する為に被験者の体幹を固定する。

脳活動計測条件として、TRは2,500[ms]、TEは35[ms]とする。計測はBlock-designで行い、被験者は25秒間の静止と25秒間の歩行模擬動作を交互に4回繰り返す。静止時及び動作時にそれぞれ合計40回、計80回の撮像を行う。被験者への動作開始の合図は視覚的にスクリーン表示を行う。

脳活動の解析はMATLAB (ver. 8.1, MathWorks Inc., Massachusetts, USA)上で動作するSPM8 (Wellcome Trust Center for Neuroimaging, London, UK)を用いて歩行模擬動作時の脳活動を示す。なお、多重比較補正はFDR (False Discovery Rate) $p < 0.05$, Extent threshold $k=100$ とする。

4. 研究成果

(1) 生体電位遷移による評価

Table 1に歩行模擬動作及び歩行1サイクル(立脚期が0-約65[%]、遊脚期は約65-100[%])中のBEP遷移の相関係数(R)を筋ごとに示す。IP(Fig.1-a)及びQF(Fig.1-b)において歩行模擬動作と歩行でBEP遷移に中程度の相関

があることを確認した($0.4 < R < 0.7$)。TA(Fig.1-d)及びSOL(Fig.1-e)において、歩行模擬動作と歩行でBEP遷移に強い相関があることを確認した($R > 0.7$)。BF(Fig.1-c)において、歩行模擬動作と歩行でBEP遷移に相関が見られなかった($R < 0.2$)。BFは股関節の伸展及び膝関節の屈曲に関わる筋である。歩行時、BFは立脚初期に強く活動している。一方で歩行模擬動作時には立脚終期に強く活動している。歩行時には立脚初期に体を前方へ移動することや遊脚初期に膝関節を屈曲するためにBFが高い活動を示す。しかし、歩行模擬動作時には立脚初期から中期にかけて膝関節を伸ばそうとする意志が働いており、立脚初期の活動が低いと考えられる。また、立脚中期から終期にかけて後方へ脚を蹴ろうとする意志が働いており、立脚終期に筋活動が高まったと考えられる。歩行模擬動作では普段意識せずに行う歩行動作を仰向け姿勢で意識して行うことにより実歩行時と比較して異なるタイミングでBFが活動してしまうが、IP、QF、TA及びSOLは歩行時と同様なタイミングで活動している。特にTA及びSOLは足関節の拮抗筋であり、LoMSにより歩行時の足関節の底背屈動作感覚を与えることが可能であることを確認した。

Table 1 Correlation coefficient between treadmill gait and gait-like motion.

	A	B	C	D	E	F	G	H	Ave.	S.D.
IP	0.554	0.473	0.118	0.985	0.728	0.201	0.719	0.247	0.503	0.282
QF	0.610	0.364	0.395	0.633	0.690	0.641	0.498	0.941	0.596	0.172
BF	-0.705	-0.608	-0.190	-0.694	-0.265	0.150	0.230	0.323	-0.220	0.395
TA	0.703	0.835	0.766	0.787	0.710	0.754	0.849	0.843	0.781	0.054
SOL	0.860	0.700	0.911	0.948	0.737	0.775	0.819	0.941	0.836	0.088

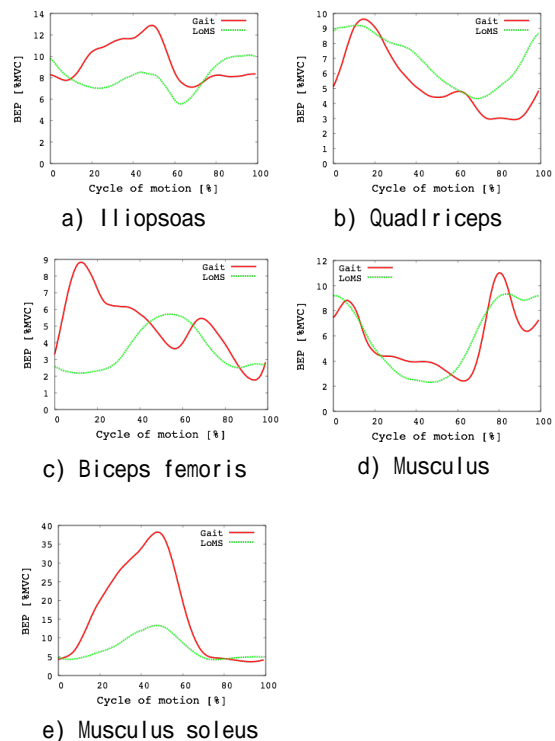


Fig. 1 Mean BEP transition comparing treadmill gait and gait-like motion with LoMS

(2) 足関節底屈筋の抑制による評価

Fig. 2に全ての被験者のH波強度の平均値を示す。赤はトレッドミル歩行時、緑は歩行模擬動作時のH波強度を示す。t検定の結果、立脚期（1-4相）と比較し、遊脚期（6-10相）のH波強度は有意に低下した（ $p < 0.05$ ）。トレッドミル歩行時では立脚終期（5相）に対して遊脚前中期（6-8相）のH波強度は有意に低したが、遊脚終期（9-10相）の低下に有意差は見られなかった。歩行模擬動作時では立脚終期（5相）相に対して遊脚期のH波強度の低下に有意差は見られなかった。両動作の5相では遊脚期の準備に入っており、H波強度が低下し始めていると考えられる。以上より、歩行模擬動作時によって歩行時の遊脚期に生じる足関節底屈筋の抑制を誘発可能であることを確認した。

(3) 歩行模擬動作時の脳活動解析

LoMS を装着し歩行模擬動作を行った際の脳活動画像を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は活動領域を矢状面、冠状面、水平面に表示している。正中線付近の一次運動野（M1）、補足運動野（SMA）及び一次体性感覚野（S1）で強い賦活が見られた。これらの領域は下肢の動作に関連する領域であり、Miyai らの研究において歩行時の脳活動を NIRS により計測した際に活動が同様の領域で観測されている（I. Miyai et al., 2001）。したがって本結果は歩行模擬動作時の脳活動画像として妥当である。よって LoMS を装着し、LoMS が動作提示し装着者が歩行模擬動作を行う際の脳活動を MRI により撮像可能であることを確認した。

(4) 高磁場対応型外骨格型教示システムの研究開発

外部から力が加えられたときの受動運動が及ぼす脳活動を調べることを目的とした4指の屈曲運動を支援する高磁場環境対応型の外骨格型教示システムを設計・製作した。この教示システムは、高磁場環境下で稼動できるように樹脂にて機構部を製作し、空気圧アクチュエータにて駆動する機構を採用した。また、コントローラおよびコンプレッサ

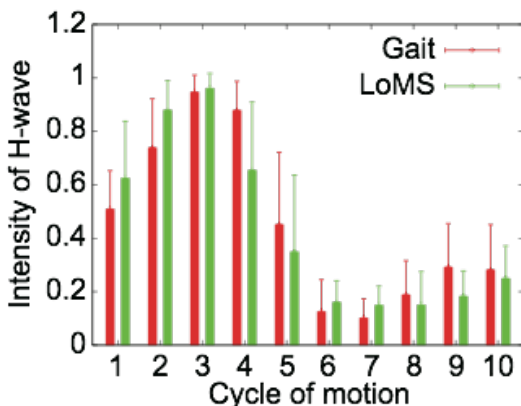


Fig. 2 Mean intensity of H-wave in a cycle of motion comparing treadmill gait and gait-like motion.

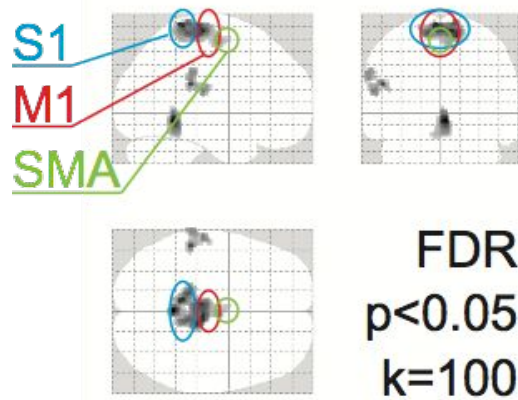


Fig.3 Activated region of brain during gait-like motion: More black area is more activated.

ーは、MRI 計測室に隣接する準備室に配置した。この開発した外骨格教示システムが、1) 脳活動が fMRI によって正常に計測できること、2) 本システムが MRI 環境で正常に稼動することを実験により確認し、MRI 適合性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Takahiro Ikeda, Akira Matsushita, Kousaku Saotome, Yasuhisa Hasegawa, Akira Matsumura, Yoshiyuki Sankai, Muscle activity during gait-like motion provided by MRI compatible lower extremity motion simulator, *Advanced Robotics*, Vol.30, No.7, pp.459-475, 2016

池田貴公, 松下明, 五月女康作, 長谷川泰久, 松村明, 山海嘉之, MRI 適合性を有する下肢動作提示システム LoMS, *日本ロボット学会誌*, Vol.33, pp.115-123, 2015

〔学会発表〕(計 2 件)

Kun Liu, Yasuhisa Hasegawa, Noel Segura Meraz, Mengzi Li, Development of MRI Compatible Tapping Assistive Robot, *1P1-K11, ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2017年5月10日, 福島

Takahiro Ikeda, Akira Matsushita, Kousaku Saotome, Yasuhisa Hasegawa, Akira Matsumura, Yoshiyuki Sankai, Toshio Fukuda, MRI Compatibility of Lower-extremity Motion Simulator: LoMS, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015), pp.586-591, May 26 2015, Seattle, Washington

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

6. 研究組織
(1) 研究代表者
長谷川 泰久 (HASEGAWA Yasuhisa)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70303675